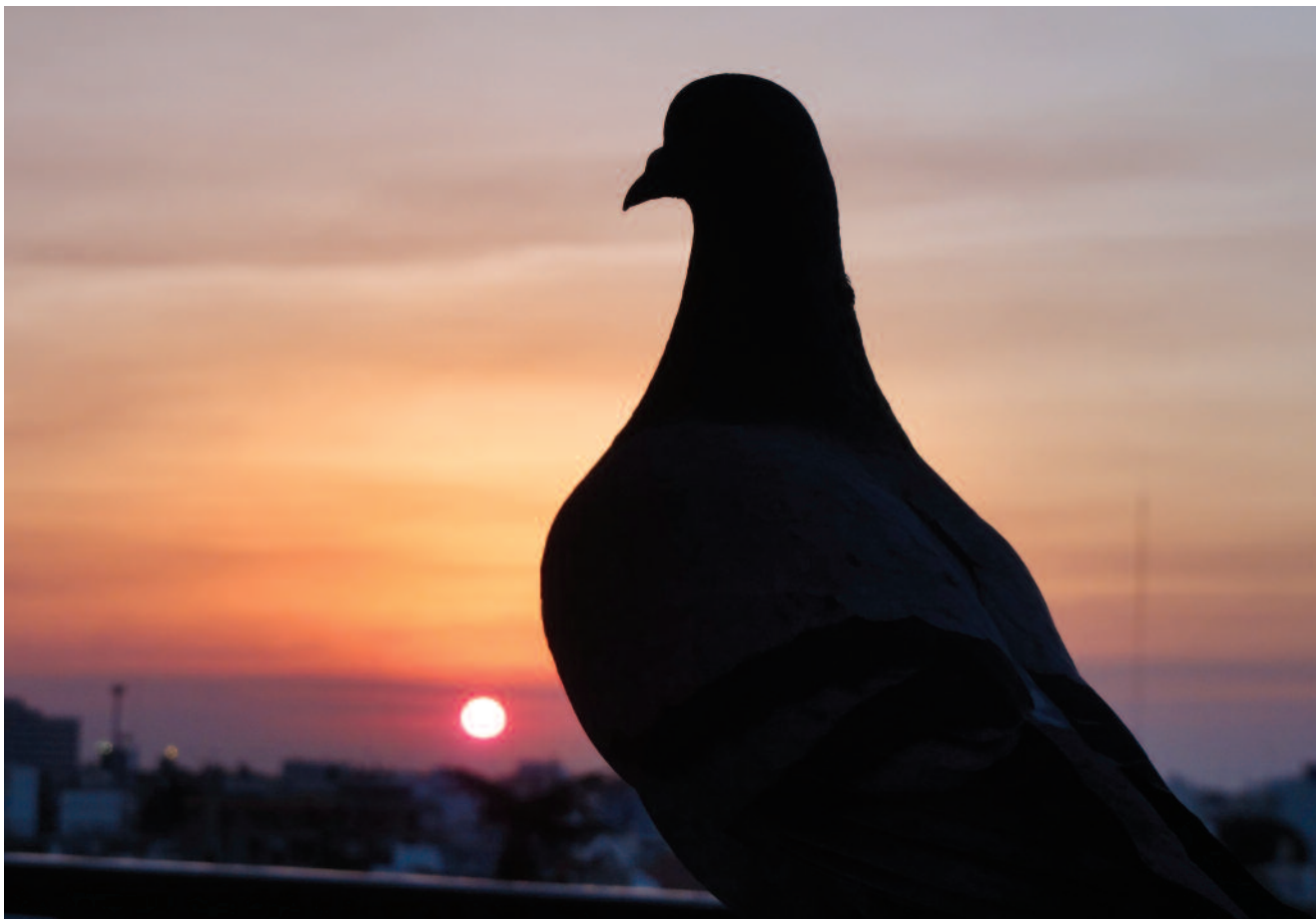


LA INEVITABLE TENDENCIA AL DESORDEN Y LA (APARENTE) PARADOJA DE LA VIDA

La vida y el Sol

Por Leonardo González Galli, Instituto de Investigación en Enseñanza de las Ciencias CEFIEC – FCEN – UBA / CONICET / Escuela Argentina de Naturalistas – Aves Argentinas.



Los seres vivos toman materia simple de su entorno y la organizan construyendo sistemas altamente complejos, lo que parece contradecir la natural tendencia al desorden del universo conocida como entropía. ¿Cómo logran los seres vivos construirse y perpetuarse contra esta tendencia a la degradación? La clave está en su habilidad para utilizar la energía proveniente del Sol para imponer orden a la materia que los constituye.

Según los físicos, una de las leyes que rigen el comportamiento de la materia es la llamada “segunda ley de la termodinámica”, según la cual “los sistemas naturales tienden a avanzar hacia estados de mayor desorden”. Algunos fenómenos cotidianos pueden acercarnos intuitivamente a esta idea. Por ejemplo, es más fácil esparcir miles de moléculas de perfume en una habitación (es lo que sucede cada vez que abrimos el

frasco) que volver a reunirlos *trabajosamente* dentro del frasco. Las moléculas del perfume están más desordenadas cuando se encuentran dispersas por el aire de la habitación que cuando están en el líquido del frasco.

Reparemos ahora en un fenómeno biológico cuya familiaridad oculta su complejidad: el crecimiento de una planta. Imaginemos que sembramos una semilla de ceibo. La semilla germina y la planta

comienza a crecer. Un tiempo después, el joven ceibo pesa, digamos, dos kilogramos. Asumiendo que la semilla pesaba un gramo, podemos preguntarnos de dónde salieron los otros 1999 gramos. Aunque las personas tienden a pensar que la planta obtuvo toda esa materia del suelo o del agua, la respuesta es más interesante aún: básicamente, tomó toda esa materia del aire. La mayor parte de los tejidos de la planta está formada por moléculas (como

la celulosa) que tienen como principal componente el carbono. La planta obtuvo ese carbono de las moléculas de dióxido de carbono (CO_2 , para los químicos) que se encuentran en estado gaseoso formando parte del aire. Pensemos ahora este proceso en términos de orden: ¿los átomos de carbono están más ordenados cuando forman parte del gas atmosférico o cuando forman parte de los tejidos de la planta? Claramente, estos átomos están más ordenados cuando forman parte de la sólida estructura de la planta. Esto significa que la planta logró incrementar el orden de un sistema. Lo que hizo es equivalente a reunir nuevamente las moléculas de perfume en el frasco. Pero la planta es un objeto físico y, como tal, está sujeta a la segunda ley de la termodinámica. Tenemos aquí una (aparente) paradoja; se supone que los sistemas naturales tienden al desorden, pero las plantas parecen hacer todo lo contrario cuando crecen.

Ordenar cuesta trabajo, y para hacer un trabajo hace falta energía

La paradoja es sólo aparente porque las leyes de la termodinámica sólo valen para sistemas aislados (no intercambian materia y energía con su entorno), mientras que una planta es un sistema abierto (intercambia materia y energía con su entorno). Los átomos de carbono no se ordenan espontáneamente formando las moléculas constituyentes de la planta, sino que ésta los *fuerza* a ordenarse, es decir, la planta hace un *trabajo* para lograr este orden. Si lo pensamos brevemente, veremos que todos los seres vivos hacen esto. ¿O no se incrementa el orden de las moléculas contenidas en la comida de un puma cuando éste las utiliza para hacer más pumas, es decir, cuando se reproduce? Al igual que la planta, el puma logra este incremento de orden gracias a un arduo trabajo fisiológico. Y, para realizar un trabajo, tanto el puma como la planta necesitan energía. Estar vivo implica necesariamente tomar materia y usar energía para incrementar el orden de esa materia, de modo de construir y mantener un cuerpo viviente: **el tipo de objeto más complejo del universo**. Cuando un organismo falla en esta labor, el resultado es la muerte y la degradación física que le sigue. Así, un sistema (como es un ser

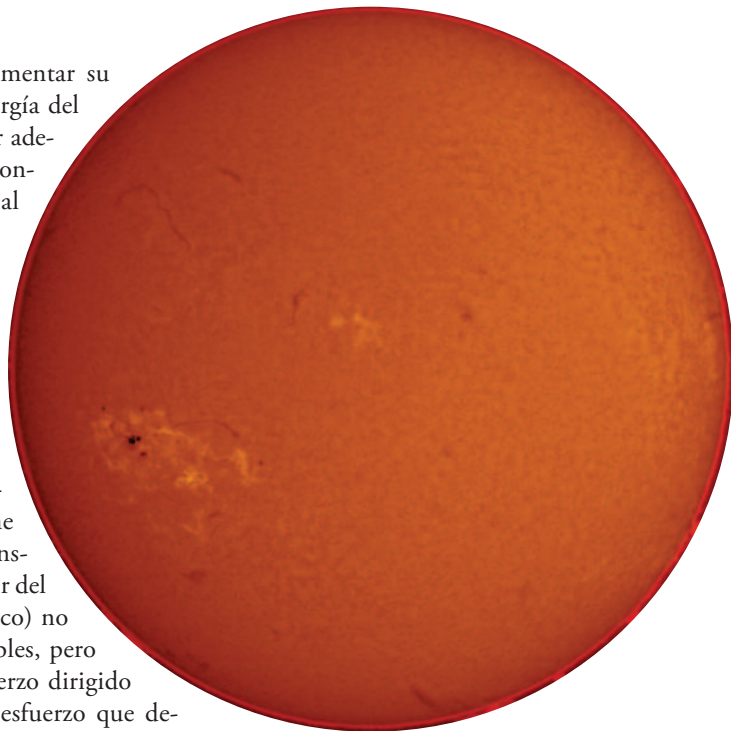
vivo) puede incrementar su orden si toma energía del exterior para llevar adelante un esfuerzo contra la tendencia al desorden.

Destacamos el verbo *trabajar* para enfatizar el hecho de que los procesos contrarios a la entropía (en nuestros ejemplos, concentrar las moléculas de perfume en el frasco o construir tejidos a partir del carbono atmosférico) no son tareas imposibles, pero requieren un esfuerzo dirigido en esa dirección, esfuerzo que demanda siempre de un aporte de *energía*. Podríamos sintetizar esta idea diciendo que “ordenar cuesta trabajo, y para hacer un trabajo, hace falta energía”.

¿De dónde obtienen los seres vivos la energía para luchar contra la entropía?

Alterando el orden numérico, es momento de introducir la primera ley de la termodinámica, según la cual “la energía no se crea ni se destruye”. La energía puede cambiar de forma, por así decirlo, pero la cantidad total siempre es la misma. Por ejemplo, cuando se realiza la combustión de la nafta en el motor de un automóvil, la energía que estaba contenida en los enlaces químicos de las moléculas del combustible se transforma en movimiento y calor. Pero la cantidad total de energía es la misma. Volviendo al ejemplo de los seres vivos, esto implica que todo ser vivo debe conseguir energía de alguna fuente para mantenerse vivo o, lo que es lo mismo, para luchar contra la inexorable degradación entrópica. Ahora bien, ¿de dónde y cómo obtienen los organismos la energía necesaria para mantenerse vivos?

Como sabemos, todos los seres vivos están compuestos por unas pequeñas unidades funcionales llamadas células. En última instancia todos los procesos biológicos son llevados a cabo por las células que conforman el organismo. Por eso, cada célula necesita obtener energía. Y esta ener-



gía tiene que estar contenida en los enlaces químicos de algunas moléculas, es decir, en las uniones entre los átomos que forman dichas moléculas. Hay moléculas, como la glucosa, cuyos enlaces químicos contienen mucha energía. Estas moléculas constituyen el combustible de la célula. Así, para todo ser vivo, conseguir energía significa conseguir moléculas con enlaces químicos muy energéticos (en general, glucosa u otro carbohidrato).

Una vez conseguidas esas moléculas, la célula las rompe de modo que la energía que mantenía unidos los átomos se libera y puede ser utilizada para llevar a cabo los procesos biológicos. Podemos entonces reformular la pregunta: “¿de dónde y cómo obtienen la energía necesaria para mantenerse vivos los organismos?”, como: “¿de dónde y cómo obtienen las moléculas ricas en energía necesarias para mantenerse vivos los organismos?”.

En relación con esta pregunta podemos clasificar a los seres vivos en dos grandes clases: aquellos que construyen ellos mismos estas moléculas ricas en energía (“autótrofos”), y aquellos que las obtienen ya construidas (“heterótrofos”). Hongos, animales y numerosos tipos de microorganismos somos heterótrofos; mientras que las plantas, las algas y muchos microorganismos son autótrofos. Insistamos en un punto importante: lo que diferencia a los autótrofos de los heterótrofos es la

Luis Angerich.



Adriana Ruidíaz.



Semillas, una flor y un árbol de ceibo. Si sembramos la semilla y ésta germina, la planta comienza a crecer. Después de cierto tiempo será todo un árbol, gracias a la materia que toma, fundamentalmente, del aire.

fuelle de las moléculas de combustible; los primeros las fabrican ellos mismos, mientras que los segundos las toman ya fabricadas. Pero luego, todas las células (autótrofas y heterótrofas) toman esas moléculas energéticas y las destruyen para utilizar la energía liberada. Este proceso de ruptura (llamado respiración celular) requiere que las moléculas de combustible se combinen con moléculas de oxígeno, motivo por el cual se dice que este proceso es un caso de oxidación. También es un proceso de combustión, es decir, un proceso en el que un material “se quema” al combinarse con oxígeno. Ésta es la razón por la cual la gran mayoría de los seres vivos necesitamos del oxígeno.

Pero, en definitiva, todo viene del Sol

En síntesis, podríamos decir que todos los seres vivos necesitan combustible (moléculas ricas en energía) y que la diferencia está entre quienes buscamos el combustible ya elaborado para consumirlo (heterótrofos) y quienes tienen la habilidad de elaborarlo (autótrofos).

¿Cuál es la fuente de combusti-

Algunos mitos sobre la fotosíntesis y la respiración

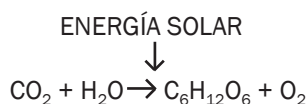
Muchas personas participan de alguna u otra versión de las siguientes tres ideas, todas incorrectas:

- Mito N° 1:** Los animales respiran y las plantas hacen fotosíntesis.
- Mito N° 2:** Las plantas hacen fotosíntesis de día y respiran de noche, por lo que es perjudicial mantener plantas en el dormitorio.
- Mito N° 3:** Los bosques son “los pulmones del mundo”.

Con respecto a la primera idea hemos explicado que toda célula (vegetal, animal o de otro tipo) debe llevar a cabo la respiración celular (la oxidación de la glucosa o de alguna otra molécula rica en energía) que le permita obtener la energía necesaria para vivir. Hemos señalado también que la diferencia entre plantas y animales radica en que las primeras elaboran la glucosa (mediante la fotosíntesis) mientras que los segundos la toman de sus alimentos. Así, tanto plantas como animales necesitan respirar continuamente. Esto nos lleva a la segunda idea y resultará ya evidente a esta altura que la planta debe respirar tanto de día como de noche. Dado que la fotosíntesis requiere de la energía solar, sí es cierto que este proceso no se puede llevar a cabo durante la oscuridad nocturna. En cualquier caso, si el lector teme dormir en el mismo ambiente en el que mantiene una planta, tenga presente que otro ser humano consume mucho más oxígeno que una planta. Con respecto al tercer mito, se trata de una analogía basada en el falso supuesto de que las plantas únicamente “producen oxígeno”, olvidando que también lo consumen cuando respiran. Así, una planta sólo funcionará efectivamente como una inyectora de oxígeno en la atmósfera cuando la cantidad de oxígeno que produce mediante la fotosíntesis supere la cantidad que consume mediante respiración. Este balance es complejo y depende de varios factores, pero en el caso de los bosques no permite afirmar que “oxigenen el mundo”. ¡Esto no implica que los bosques no sean valiosos y dignos de ser conservados! Son innumerables los buenos motivos para conservarlos. En relación con el clima cumplen una función fundamental: de no existir los bosques, todo el carbono que está formando parte de los millones de toneladas de tejidos vegetales que los forman estaría en la atmósfera en forma de moléculas de dióxido de carbono, sustancia que constituye uno de los principales gases de efecto invernadero, es decir, una de las causas del calentamiento global. Así, los bosques funcionan como depósitos de carbono que, de otro modo, contribuiría al peligroso proceso de calentamiento global que está afectando a nuestro planeta.

ble para los heterótrofos? Básicamente, otros seres vivos; debemos comer otros organismos. Un ser vivo que sirve de alimento a un heterótrofo puede ser a su vez otro heterótrofo. Estas cadenas de heterótrofos que se comen unos a otros pueden tener distintas longitudes pero, más tarde o más temprano, se llegará a que el último eslabón es un autótrofo. Es decir, alguien tiene que fabricar las moléculas ricas en energía que luego pasarán de un heterótrofo a otro. Estas relaciones constituyen las conocidas “cadenas alimentarias” o “tróficas” (que en la realidad se relacionan entre sí formando complejas “redes tróficas”). Por ejemplo, en la selva misionera, el yaguararé come al hurón, el hurón come a la yarára, la yarára come al ratón y éste, finalmente, come plantas, y son estas plantas las que fabricaron el combustible. Es decir, las plantas son las únicas autótrofas en esta cadena.

Ahora bien, los autótrofos fabrican el combustible, pero no la energía (recordemos la primera ley de la termodinámica). ¿De dónde sale entonces esta energía? La respuesta, ya sospechada seguramente por el lector, es “del Sol”. En efecto, el principal mecanismo mediante el cual los autótrofos elaboran el combustible de la vida es la *fotosíntesis*. Básicamente, la fotosíntesis consiste en que las plantas (al igual que las algas y ciertas bacterias) toman moléculas pobres en energía (dióxido de carbono, CO_2 , y agua, H_2O) y utilizan la energía radiante del Sol para fabricar moléculas ricas en energía (glucosa, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), y liberan oxígeno (O_2) como desecho. Los bioquímicos resumen este proceso con la siguiente “ecuación química”:



Con estos conceptos podemos entender por qué los ecólogos denominan “productores” a las plantas y “consumidores” a los animales y hongos.

De este modo, los organismos fotosintéticos funcionan como “inyectores” de energía en los ecosistemas. Ningún animal ni hongo puede alimentarse directamente de la energía solar. Son las plantas las que introducen la energía solar en moléculas que luego pueden ser consumidas

por las propias plantas y por los animales y demás heterótrofos.

Así, la energía proveniente del Sol es captada por las plantas (el primer nivel trófico o “productores”) y luego utilizada por los herbívoros (el segundo nivel trófico o “consumidores primarios”) y por los carnívoros (el tercer nivel trófico o “consumidores secundarios”). Estas relaciones tróficas determinan un flujo de la energía en los ecosistemas.

Siempre hay una pérdida de la energía “útil”

No toda la energía solar que llega a la Tierra es captada por las plantas. Además, de la energía solar efectivamente captada por las plantas no toda es convertida en energía química, es decir, contenida en las uniones entre átomos de la glucosa producto de la fotosíntesis. Del mismo modo, no toda la energía contenida en los tejidos vegetales consumidos

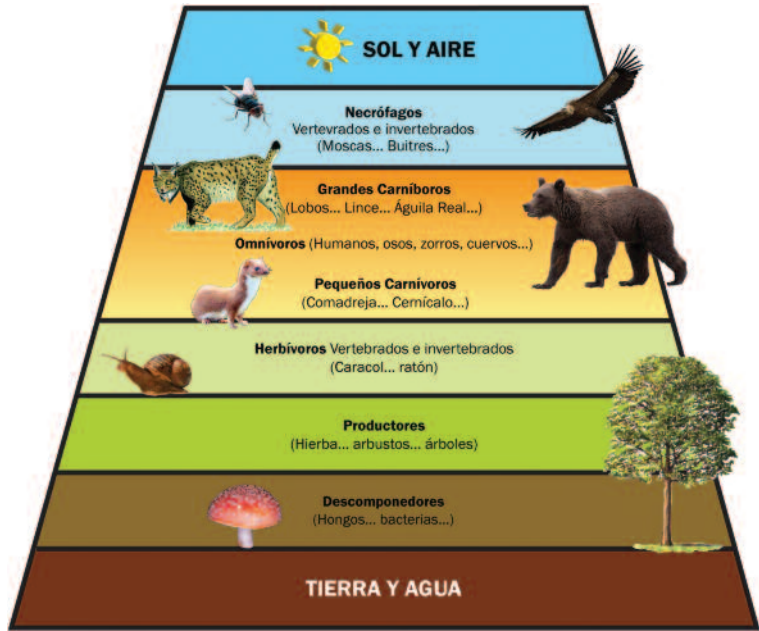
Curiosos ecosistemas no basados en la energía solar

Hemos explicado en el texto principal que el flujo de energía que permite la vida proviene, en última instancia, de la energía radiante del Sol. En términos generales, esto es así, pero existen algunas interesantes excepciones. Nos referimos a ecosistemas enteros (aunque relativamente pequeños y escasos) cuya fuente última de energía no es el Sol sino la energía geotérmica (el calor liberado desde el interior de nuestro planeta). Los más estudiados de estos ecosistemas son los que se encuentran en las fumarolas hidrotermales de los fondos oceánicos. Se trata de grietas en la corteza terrestre por las que emerge agua a altas temperaturas. Estas grietas se encuentran en los fondos oceánicos, especialmente en las dorsales oceánicas donde las placas tectónicas se encuentran y la actividad volcánica es intensa. Se trata de ambientes muy particulares en los que imperan condiciones extremas; la luz solar está totalmente ausente, la presión y la temperatura son muy elevadas y el oxígeno es muy escaso. Los “productores” de estos ecosistemas son bacterias quimioquilótrofas¹, lo que significa que no obtienen la energía necesaria para fabricar moléculas nutritivas de la luz solar sino de ciertas sustancias químicas inorgánicas. De las grietas sale ácido sulfhídrico (H_2S) que es oxidado por las bacterias que utilizan parte de la energía liberada en este proceso para fabricar moléculas ricas en energía a partir del dióxido de carbono (CO_2), que también emana de las grietas del fondo (otras bacterias utilizan metano en vez de ácido sulfhídrico). Lo que permite a las bacterias llevar a cabo estas reacciones químicas es la energía provista por el agua caliente. Por eso decimos que, en última instancia, la energía que alimenta estos ecosistemas proviene del interior de la Tierra. Así, estas bacterias se convierten en el equivalente de las plantas, ya que son las productoras, es decir, los únicos organismos que fabrican moléculas ricas en energía que luego sirven de alimento a una variada fauna de heterótrofos en estos ecosistemas. ¡Estas bacterias crecen en agua a más de 100°C ! En las fumarolas se desarrolla una variada vida animal. Los animales no pueden sobrevivir a temperaturas tan elevadas, pero prosperan en las aguas menos cálidas donde el agua caliente que emerge del interior del planeta se mezcla con el agua fría circundante. Diversos crustáceos pequeños se alimentan de las capas de bacterias quimioquilótrofas y sirven a su vez de alimento a numerosos depredadores tales como caracoles, cangrejos, camarones y pulpos. Se destacan entre la fauna de las fumarolas grandes gusanos tubícolas que viven en simbiosis con bacterias que habitan sus tejidos. Recientemente se han descubierto otras comunidades biológicas no dependientes del Sol en algunas grutas.

por un herbívoro queda contenida en los tejidos del herbívoro. Esto se debe a que en todo proceso de transformación de energía una fracción de la misma se pierde en forma de calor. Esta energía ya no podrá ser utilizada para otros procesos. Por ejemplo, de toda la energía contenida en las moléculas de combustible que utiliza un automóvil sólo un porcentaje se convierte en movimiento, mientras que el resto se pierde en forma de calor. Dado que el motor está diseñado para producir movimiento, se considerará más eficaz cuanto menor sea la pérdida de energía en forma de calor. Lo mismo sucede en los ecosistemas, de modo que la energía “útil” se reduce con cada proceso de flujo de energía. En general, se calcula que en un ecosistema sólo el 10% de la energía pasa de un nivel trófico al siguiente.

En síntesis

A partir de todo lo dicho, es evidente que la vida en la Tierra –tal como la conocemos– no sería posible sin el aporte energético del Sol, aunque existen algunas comunidades biológicas que actualmente no dependen del Sol (ver recuadro). Aunque las personas preocupadas (¡con mucha razón!) por la actual crisis ambiental suelen decir que la actividad humana pone en peligro la continuidad de la vida sobre la Tierra, es probable que esta idea sea otra muestra de la soberbia humana. Acordamos con el paleontólogo estadounidense Stephen Gould cuando señala que nuestra especie no tiene realmente el poder para terminar con la vida. En efecto, aún el peor desastre ambiental concebible que pudiéramos desencadenar sería incapaz de eliminar todas las bacterias. Por supuesto, semejante desastre terminaría con la vida humana y la de muchas otras especies, y el mundo ya no sería un lugar verde con la notable diversidad que llegamos a conocer. Pero las bacterias (y muy probablemente muchos otros organismos) sobrevivirían y evolucionarían de modo que, después de millones de años, darían origen a un nuevo mundo, con una nueva diversidad cuyo catálogo, seguramente y para su fortuna, no incluiría a los humanos. Así pues, todo indica que la vida continuará evolucionando en este planeta hasta que, finalmente, será el Sol el que sellará su destino



Ningún animal ni hongo puede alimentarse directamente de la energía solar. Las plantas introducen la energía solar en moléculas que luego pueden ser consumidas por las propias.

(ver artículo de la página 5). Por el momento y por muchos millones de años más, esta estrella seguirá aportando la energía que permite la vida, la nuestra y la de todos los demás productos de la evolución. Esperemos que, como especie, tengamos la suficiente sabiduría como para llevar adelante los cambios necesarios (¡y urgentes!) para que este flujo energético siga alimentando una gran variedad de formas de vida. ■

bono como fuente de carbono y obtiene energía mediante la oxidación de sustancias inorgánicas de su ambiente.

El autor: **Leonardo González Galli** es Doctor en Ciencias Biológicas (FCEN-UBA) y Profesor de Enseñanza Media Superior en Biología (FCEN-UBA). Es Investigador del CONICET y Profesor Adjunto en el profesorado de biología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. También se desempeña como Director y docente de la Escuela Argentina de Naturalistas (Aves Argentinas – Asociación Ornitológica del Plata).

1 Organismo que utiliza dióxido de car-



Natalia Jacand.

Ningún animal ni hongo puede alimentarse directamente de la energía solar. Las plantas introducen la energía solar en moléculas que luego pueden ser consumidas por las propias plantas y por los animales y demás heterótrofos.